

Influência do superplastificante nos parâmetros reológicos do betão fresco

Aires Camões¹

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

RESUMO

O conhecimento das propriedades reológicas do betão fresco é de extrema importância para o sucesso da sua aplicação. A trabalhabilidade dos betões influencia decisivamente parâmetros fundamentais relacionados com a eficácia da sua utilização, tais como: a facilidade de colocação em obra; a compactação; a durabilidade; e o desenvolvimento das resistências mecânicas. Um betão fresco com comportamento reológico inadequado pode comprometer seriamente o processo de compactação, o que pode implicar a ocorrência de defeitos que podem afectar substancialmente o desempenho do betão no estado endurecido. A importância deste aspecto levou ao desenvolvimento de vários métodos, utilizados para aferir as características reológicas do betão fresco que pode ser entendido como uma concentração de partículas em suspensão que exibe um comportamento semelhante ao de um fluido. Neste contexto, admitindo que as propriedades reológicas da pasta ligante controlam a trabalhabilidade dos betões com adição de superplastificante, elaborou-se um programa experimental com o intuito de avaliar a influência do adjuvante nos parâmetros reológicos das composições. No âmbito deste programa experimental procedeu-se ao ensaio de pastas utilizando um equipamento capaz de determinar os parâmetros reológicos das mesmas (viscosímetro de Brookfield), o que permitiu avaliar a exequibilidade do ensaio expedito no cone de Marsh, correntemente utilizado para determinar a dosagem de superplastificante a usar em betões. Os resultados obtidos são apresentados e analisados.

1. REOLOGIA DE FLUIDOS E SUSPENSÕES

Admitindo que um fluido laminar de área A (suficientemente grande para não ser necessário ter em conta as condições fronteira) está contido entre duas placas com área muito superior a A (dispostas de forma paralela a uma distância y) e considerando que a superfície inferior se encontra imóvel enquanto que a superior se desloca com uma velocidade V (devido à aplicação de uma força de corte F), se a distância entre as duas superfícies e a velocidade V não forem muito elevadas, pode-se considerar que a distribuição da velocidade, v , de cada plano paralelo de fluxo (definido relativamente à sua normal) é linear (ver Figura 1).

¹ Professor Auxiliar (aires@civil.uminho.pt)

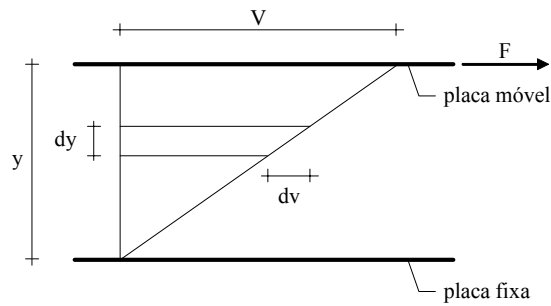


Figura 1 – Distribuição de velocidades de um fluido laminar.

Para uma vasta gama de fluidos, como os gases e os líquidos homogêneos, constata-se que a tensão de corte, τ , exercida entre dois planos paralelos do fluido é proporcional ao gradiente de velocidade, $\dot{\gamma}$, verificado numa direcção perpendicular à do escoamento:

$$\frac{F}{A} = \tau = \eta \frac{dv}{dy} \text{ ou } \tau = \eta \dot{\gamma}, \quad (1)$$

em que F é a força de corte aplicada, A é a área do plano paralelo à força, τ é tensão de corte ($\tau = F / A$), η é a viscosidade, e $\dot{\gamma}$ o gradiente de velocidade ($\dot{\gamma} = dv / dy$).

A eq. (1) evidencia que se a um líquido laminar é aplicada uma força de corte F , é induzido um gradiente de velocidade ao sistema. O factor de proporcionalidade entre a força e o gradiente de velocidade é designado por viscosidade. O comportamento reológico de um fluido que satisfaça a eq. (1) é designado newtoniano e é caracterizado por um só parâmetro: a viscosidade. A grande maioria das expressões propostas para descrever o comportamento de suspensões concentradas, entendidas como uma suspensão de partículas sólidas num líquido viscoso, é de dois tipos. Umas relacionam a concentração da suspensão com a viscosidade, enquanto que outras expressam a tensão de corte em função do gradiente de velocidade, assumindo que a viscosidade do sistema é representada por um só valor constante.

Tabela 1 – Relações entre a tensão de corte e o gradiente de velocidade (Ferraris (1999)).

Autor	Expressão
Newton	$\tau = \eta \dot{\gamma}$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$
Herschel e Bulkley	$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n$
Lei de potência	$\tau = A \dot{\gamma}^n$
Von Berg e Oswald-de-Waele	$\tau = \tau_0 + B \sinh^{-1}(\dot{\gamma} / C)$
Eyring	$\tau = a \dot{\gamma} + B \sinh^{-1}(\dot{\gamma} / C)$
Robertson-Stiff	$\tau = a(\dot{\gamma} + C)^b$
Atzeni, Massida e Sanna	$\dot{\gamma} = \alpha \tau^2 + \beta \tau + \delta$

τ – tensão de corte;

τ_0 – tensão limite de escoamento;

$A, a, B, b, C, k, \alpha, \beta, \delta$ – constantes;

η – viscosidade;

$\dot{\gamma}$ – gradiente de velocidade.

Na Tabela 1 representam-se as expressões que relacionam a tensão de corte com o gradiente de velocidade mais frequentemente utilizadas para caracterizar o comportamento

reológico de fluidos e suspensões (Ferraris (1999)). A principal conclusão que pode ser retirada da análise das relações propostas na Tabela 1 consiste no facto de em todas, exceptuando a aplicável a um fluido newtoniano, serem utilizados pelo menos dois parâmetros para descrever a reologia dos fluidos. As equações propostas por Bingham, Herschel e Bulkley, e Von Berg e Oswald de Waele, nomeadamente, incorporam um segundo factor caracterizador da reologia: a tensão limite de escoamento, τ_0 .

A tensão limite de escoamento (ou limite de escoamento) pode ser interpretada fisicamente como a tensão que é necessário ultrapassar para que se inicie o escoamento. Para um fluido, o limite de escoamento corresponde ao ponto de intersecção do diagrama tensão de corte versus gradiente de velocidade com o eixo correspondente à tensão de corte, representando a viscosidade o declive do mesmo diagrama. Se um fluido apresentar uma dependência linear entre as duas grandezas referidas é designado como fluido de Bingham.

2. REOLOGIA DE PASTAS, ARGAMASSAS E BETÕES

Os betões e as argamassas são materiais compostos, e os seus principais componentes são os agregados, o ligante e a água. Na realidade, e no que concerne ao comportamento reológico dos betões e das argamassas, estes materiais podem ser entendidos como uma suspensão de partículas sólidas (os agregados) num líquido viscoso (a pasta ligante). A pasta ligante também pode ser entendida como uma suspensão, sendo ela própria composta por grãos de cimento e, por vezes, de adições minerais, suspensos num líquido (a água).

Assumindo que o comportamento macroscópico de pastas, betões e argamassas pode ser associado ao de um fluido, podem ser aplicados a estas suspensões os modelos clássicos da reologia.

As expressões correntemente adoptadas para descrever a reologia de betões frescos são as que relacionam a tensão de corte com o gradiente de velocidade (Tabela 1) e também permitem avaliar o comportamento reológico de pastas e argamassas (Ferraris (1999)). A relação mais utilizada para descrever o comportamento reológico do betão fresco é a de Bingham, devido à possibilidade de medição dos dois parâmetros independentemente, e, também, porque o comportamento reológico é, em geral, traduzido satisfatoriamente recorrendo a uma relação linear (Smeplass (1993), Hu, Larrard e Gjrv (1995), Ferraris e Lobo (1998), Domone, Yongmo e Banfill (1999) e Daczko (2000)).

Assim, o comportamento reológico de pastas, argamassas e betões pode ser avaliado adoptando o modelo de Bingham, através da determinação de duas quantidades, ambas com significado físico: o limite de escoamento, τ_0 , e a viscosidade, η . No entanto, a grande maioria dos ensaios correntemente realizados não é suficiente para caracterizar o comportamento reológico das composições uma vez que permite apenas determinar um só parâmetro, eventualmente relacionado com um dos factores caracterizadores do comportamento reológico. Apesar da existência de metodologias experimentais que permitem quantificar o limite de escoamento e a viscosidade, a sua utilização em betões não se encontra generalizada devido à dificuldade de as implementar em obra e aos custos associados, significativamente superiores aos dos ensaios correntes.

3. MÉTODOS DE ENSAIO

Os métodos de ensaio utilizados na determinação das propriedades reológicas de pastas, argamassas e betões podem ser divididos em dois grupos, consoante permitam a aferição de um ou dois parâmetros.

3.1. Aferição de um parâmetro

A grande maioria dos ensaios convencionais permite, apenas, a medição de um parâmetro. A relação entre o factor medido e a viscosidade ou o limite de escoamento não é óbvia. Em geral, τ_0 ou η não podem ser calculados recorrendo aos valores medidos, embora possa, eventualmente, existir uma relação entre eles.

Os principais ensaios utilizados para a avaliação da trabalhabilidade de pastas, argamassas e betões, aferida através de apenas um parâmetro são os seguintes (Ferraris, (1999)): ensaio de abaixamento; ensaio de espalhamento; VB; cone de fluidez (cone de Marsh); mini-abaixamento; ensaios de penetração: bola de Kelly; aparelho de Vicat; ensaio de Wigmore; *K-slump test*; maniabilímetro LCL; ensaio de Fritsch; tubo viscosímetro; capacidade de preenchimento: *L box*, *box test*; e aparelho de Orimet. Os ensaios de abaixamento, de penetração e o *K-slump test*, estão relacionados com o limite de escoamento porque permitem medir a capacidade das misturas começarem a fluir. Os restantes ensaios relacionam-se com a viscosidade, sendo os seus resultados reflexo da capacidade do material escoar após a tensão de corte instalada ultrapassar a tensão limite de escoamento. A tensão de corte aplicada pode ser obtida por vibração (espalhamento, VB, maniabilímetro LCL e ensaio de Fritsch) ou por gravidade (cone de fluidez, mini-abaixamento, tubo viscosímetro, capacidade de preenchimento e aparelho de Orimet).

Em seguida, aborda-se o ensaio do cone de Marsh com maior pormenor uma vez que foi utilizado no programa experimental.

3.1.1. Cone de fluidez (cone de Marsh)

O cone de Marsh é frequentemente utilizado em pastas, nomeadamente para avaliar a compatibilidade entre o cimento e o superplastificante e para determinar o ponto de saturação dos superplastificantes, que corresponde à quantidade a partir da qual não se registam ganhos de fluidez significativos.

O ensaio do cone de Marsh consiste em registar o tempo que determinado volume de fluido demora a escoar através do orifício de descarga. Na Figura 2 é possível observar o cone de Marsh utilizado neste programa experimental, bem como as suas dimensões.

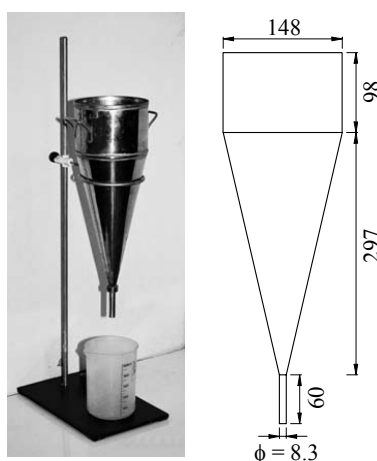


Figura 2 – Cone de Marsh utilizado nos ensaios (dimensões em mm).

O resultado deste ensaio deve estar relacionado com a viscosidade do material ensaiado. Se a suspensão escoar através do orifício, significa que a tensão instalada ultrapassa o limite de escoamento. Se o escoamento não se verificar é porque a tensão limite de escoamento é superior à tensão de corte instalada. Nestas condições, o escoamento pode ser

forçado através do aumento da massa de material, elevando a tensão de corte instalada, ou aumentando o diâmetro do tubo de descarga.

Em betões com incorporação de superplastificante, a trabalhabilidade é controlada, fundamentalmente, pela eficácia do adjuvante, contrariamente ao verificado nos outros betões, onde a água adicionada desempenha um papel primordial. Assim, caso seja assumida a validade do ensaio de pastas para a determinação do ponto de saturação dos superplastificantes, como é prática frequente, parece razoável esperar que a trabalhabilidade dos betões seja controlada pela reologia das pastas, realçando a importância de ensaios avaliadores do seu comportamento.

3.2. Aferição simultânea de dois parâmetros

As características reológicas das pastas podem ser determinadas recorrendo ao uso de viscosímetros coaxiais. Não é possível generalizar a sua utilização a betões, uma vez que a máxima dimensão do agregado obrigaria ao recurso a cilindros coaxiais com dimensões demasiado elevadas (Ferraris (1999)).

3.2.1. Viscosímetro de Brookfield

O viscosímetro de Brookfield é um dispositivo que obriga um cilindro coaxial, imerso no fluido a ensaiar, a exercer um movimento de rotação em torno do seu eixo, sujeito a velocidades angulares constantes distintas. Em teoria, para cada valor da velocidade angular, corresponde um determinado gradiente de velocidade ao qual está associado um momento torsor. O cilindro imerso no fluido está ligado a um transdutor através de uma haste rígida (*spindle*). Durante a rotação, o atrito do fluido sobre o cilindro faz com que se desenvolva um momento torsor, que é registado pelo transdutor. Quando se atinge o equilíbrio, a força que se opõe ao movimento é igual à força registada no transdutor. Essa força é directamente proporcional à viscosidade aparente, η_0 , que é registada pelo viscosímetro, e que está associada à velocidade angular imposta. Ou seja, para cada velocidade angular o viscosímetro de Brookfield regista a respectiva viscosidade aparente como se o fluido exibisse um comportamento newtoniano ($\tau_0 = 0$).

Uma das vantagens deste tipo de equipamento é que, combinando adequadamente a velocidade angular com os *spindles* disponíveis, é possível abranger uma extensa gama de gradientes de velocidade, tensões de corte e, conseqüentemente, de viscosidades e determinar o reograma $\dot{\gamma} \times \tau$ de um material. É também possível trabalhar com tensões de corte reduzidas e assim definir o reograma $\dot{\gamma} \times \tau$ na proximidade do limite de escoamento, τ_0 .

4. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

O cimento (C) utilizado no fabrico das pastas foi um CEM I 42.5R do tipo Portland e as cinzas volantes (CV) foram fornecidas pela Central Termoeléctrica do Pego. A composição química do superplastificante (SP) é baseada em naftaleno formaldeído sulfonado. As principais características destes materiais encontram-se descritas em Camões (2002), bem como o procedimento de mistura adoptado, que foi mantido constante em todas as amassaduras.

Em todas as pastas foi adoptada a relação $A / (C + CV)$ igual a 0.3 (em massa). Foram produzidas pastas com incorporação de CV em substituição de 0%, 20%, 40%, 60% e 100% da massa de cimento, enquanto que o efeito do SP foi avaliado fazendo variar a quantidade de extracto sólido de SP, expresso em relação à quantidade de ligante ($L = C + CV$): 0.25%, 0.50%, 1.0%, 1.5%, 2.0% e 3.0%.

O ensaio no cone de Marsh consiste em preencher o cone com 1000 ml de pasta e, em seguida, registar o tempo necessário para 500 ml de pasta escoarem através dele.

Após o ensaio no cone de Marsh, as pastas foram submetidas a ensaio no viscosímetro de Brookfield. O viscosímetro usado permite impor velocidades angulares de 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0, 20.0, 50.0 e 100.0 rpm e dispõe de vários *spindles*. O de maiores dimensões é o indicado para as menores viscosidades aparentes, abrangendo valores de 0 a 100 cP (para uma velocidade de 100 rpm). O procedimento adoptado nos ensaios realizados consistiu em abranger todo o leque de velocidades disponíveis, utilizando sempre o mesmo *spindle* em cada pasta. O ensaio foi iniciado com a velocidade mais baixa, aumentando-se a velocidade sucessivamente após a viscosidade aparente fornecida pelo equipamento estabilizar, sendo tal valor convenientemente registado. Depois de registado o valor da viscosidade aparente correspondente à velocidade máxima de 100.0 rpm, procedeu-se inversamente, fazendo consecutivos decréscimos da velocidade angular até atingir a velocidade mínima de 0.5 rpm. Este procedimento permite avaliar a reversibilidade do comportamento reológico das pastas. A diferença verificada no comportamento reológico das pastas quando se aplicam gradientes de velocidade crescentes e decrescentes pode ser aferida através da quantificação da área confinada entre as duas curvas. Esta quantidade permite verificar a tendência que as suspensões apresentam para alterar o seu comportamento reológico em função do regime de escoamento a que se encontram sujeitas.

Determinadas as viscosidades aparentes, η_0 , correspondentes às várias velocidades angulares aplicadas, passa-se à fase de processamento dos resultados que permite a construção das curvas que relacionam o gradiente de velocidade com a tensão de corte. O processamento dos dados baseia-se na consideração de que o movimento de rotação do *spindle* obriga a que a pasta, na qual está imerso, sofra também um movimento angular na sua vizinhança. Considerando que se forma um cilindro de pasta de raio $r = r_0$ em movimento com uma velocidade angular constante, ω_0 , e que para raios superiores a velocidade diminui continuamente até se anular, é possível demonstrar que a tensão de corte no fluido quando $r = r_0$, pode ser expressa recorrendo à eq. 2:

$$\tau = 2 \eta_0 \omega_0 \quad (2)$$

Expressando ω_0 em rpm, $\bar{\omega}_0$, a eq. 2 toma a forma:

$$\tau = \frac{\pi}{15} \eta_0 \bar{\omega}_0 \quad (3)$$

Determinada a tensão de corte, o gradiente de velocidade obtém-se dividindo a tensão de corte pela viscosidade aparente.

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_0} \quad (4)$$

Assim, é possível transformar os pares de valores $(\bar{\omega}_0; \eta_0)$, resultantes do ensaio das pastas no viscosímetro de Brookfield, em pares de valores $(\dot{\gamma}; \tau)$, e construir o respectivo reograma.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Cone de Marsh

Na Figura 3, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios das pastas no cone de Marsh. Analisando esses mesmos resultados é possível observar que:

- o ponto de saturação das pastas pode ser facilmente identificado e corresponde a uma dosagem de SP de cerca de 1.0%;
- as pastas produzidas sem cimento (CV = 100%) exibiram um comportamento reológico marcadamente diferente das restantes e apresentaram tempos de escoamento bastante superiores;
- o facto de entre as pastas fabricadas com 0.25% de SP, apenas terem fluído as constituídas com quantidades de CV superiores ou iguais a 40%, indica que a adição de CV beneficia a fluidez das pastas dotadas de reduzida quantidade de SP;
- a fluidez das pastas com $SP \geq 0.5\%$ diminui com o acréscimo de CV.

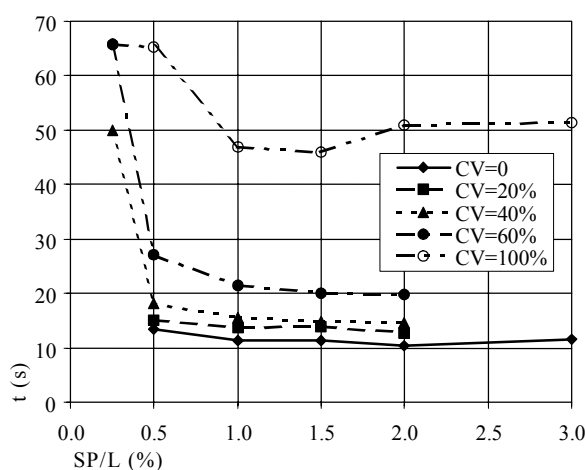


Figura 3 – Variação do tempo de escoamento com a quantidade de SP.

5.2. Viscosímetro de Brookfield

Na Figura 4 apresenta-se um reograma típico, determinado com os resultados do ensaio no viscosímetro de Brookfield da pasta fabricada sem inclusão de CV, com 0.50% de SP e com $A/L = 0.3$.

Aquando da mistura do ligante com a água, ocorre dissolução iónica e iniciam-se reacções químicas que são responsáveis pela formação de uma camada com reduzida espessura de produtos de hidratação que vai envolver as partículas de ligante não hidratadas. Esta camada pode provocar a ligação das partículas e a sua consequente aglomeração (Wang, Konsta-Gdoutos e Shah, (2002)). A Figura 4 permite identificar a existência de um comportamento reológico não reversível, claramente distinto entre a fase correspondente ao aumento da velocidade de rotação do *spindle* (tramo ascendente) e à sua diminuição (tramo descendente). O movimento do *spindle* imerso na pasta misturou-a e induziu tensões de corte que permitiram quebrar algumas das ligações responsáveis pela aglomeração das partículas de ligante, contribuindo para a desfloculação da pasta. Por este motivo, a viscosidade diminuiu com o aumento da tensão de corte durante a primeira parte do ensaio (tramo ascendente), passando o comportamento reológico durante a fase seguinte (tramo descendente) a ser

próximo do proposto por Bingham. Uma vez identificado o comportamento não reversível de determinadas pastas, adoptou-se, para estas pastas, ajustar aos resultados experimentais as relações propostas por Bingham considerando apenas a parte do reograma correspondente ao tramo descendente. Mas, nem todas as pastas ensaiadas exibiram um comportamento não reversível. Na Figura 5 apresentam-se os resultados obtidos numa composição dotada de comportamento reversível, composta com CV = 40%, SP = 1.0% e A/L = 0.3. Os reogramas das restantes composições não são aqui apresentados por se ter considerado que os ilustrados nas Figuras 4 e 5 são representativos do conjunto.

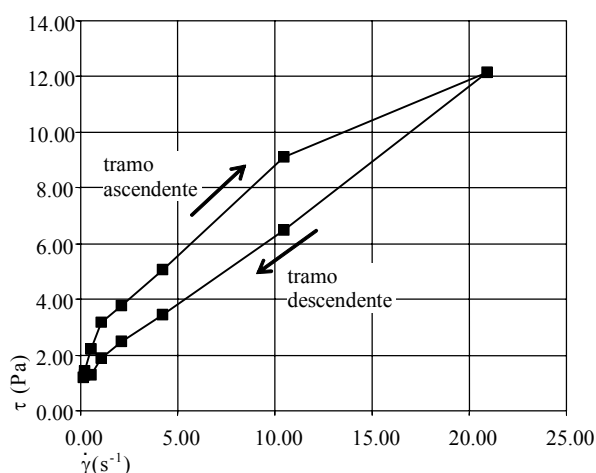


Figura 4 – Reograma típico, obtido para a composição com CV = 0%, SP = 0.50% e A/L = 0.3.

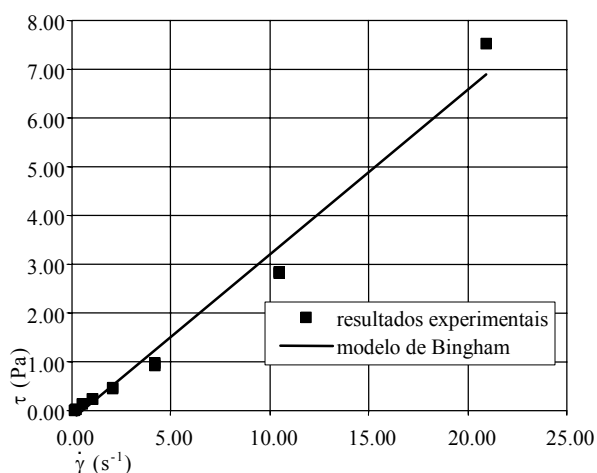


Figura 5 – Exemplo de reograma, obtido para a composição com CV = 40%, SP = 1.0% e A/L = 0.3.

A aproximação dos resultados experimentais ao modelo de Bingham foi realizada com base no método dos mínimos quadráticos e contemplou todas as misturas ensaiadas.

Não foi possível realizar o ensaio da pasta com uma dosagem de 0.25% de SP e sem adição de CV. O viscosímetro utilizado ultrapassou a sua capacidade máxima, o que inviabilizou a determinação das características dessa suspensão com uma viscosidade aparente tão elevada.

A determinação de τ_0 recorrendo ao método dos mínimos quadráticos originou a obtenção de valores negativos, sem significado físico admissível. Contudo, esses valores foram reduzidos, aproximadamente iguais a zero. Refazendo os cálculos, para os casos em que τ_0 apresentou um valor negativo, de forma a obrigar as curvas a passar na origem, foram obtidos os valores indicados na Tabela 2. Na Figura 3, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios das pastas no cone de Marsh.

Em termos gerais, a aproximação à expressão de Bingham é conseguida com coeficientes de correlação que se podem considerar satisfatórios ($0.9058 \leq R^2 \leq 0.9991$) e, com o acréscimo de SP e para maiores quantidades de CV, a aproximação ao modelo teórico, aferida através de R^2 , parece melhorar globalmente.

Para facilitar a análise da dependência dos parâmetros do modelo de Bingham, τ_0 e η , com a quantidade de SP apresenta-se a Figura 6. Através da análise desta Figura é possível apontar as seguintes tendências:

- a acção do SP contribuiu, em geral, para a diminuição da viscosidade e do limite de escoamento das pastas até dosagens de cerca de 1.0%;
- o ponto de saturação do SP também pode ser identificado recorrendo à análise dos resultados provenientes da realização deste ensaio. Este ensaio possibilita a determinação de uma quantidade óptima de SP em relação ao limite de escoamento e

outra, eventualmente distinta, tendo em conta o efeito do SP na viscosidade das pastas. No entanto, nas misturas estudadas, não foram obtidas quantidades óptimas de SP diferentes, permanecendo o seu valor relativamente a ambos os parâmetros igual a 1.0%;

- nas pastas realizadas com uma dosagem de SP correspondente ao ponto de saturação, as respectivas viscosidades apresentaram valores semelhantes, excepto na mistura constituída com 100% de CV, cuja viscosidade mínima foi substancialmente superior à das restantes;
- nas pastas ensaiadas, o ponto de saturação corresponde à dosagem de SP que permite transformar uma pasta ligante numa suspensão com comportamento newtoniano;
- nas suspensões fabricadas com menores quantidades de SP (0.25% e 0.50%) a introdução de CV provocou a diminuição do τ_0 ;
- o comportamento reológico das pastas com 100% de CV foi marcadamente diferente do das restantes;
- em termos gerais, nas pastas elaboradas com uma quantidade de SP superior a 0.25%, a viscosidade aumentou ligeiramente com o acréscimo de CV;
- a introdução de quantidades crescentes de CV até 60% diminui a viscosidade das pastas com 0.25% de SP.

Tabela 2 – Resultado da aproximação do modelo de Bingham aos valores experimentais.

CV/L (%)	SP/L (%)	Bingham		
		τ_0 (Pa)	η (Pa.s)	R^2
0	0.50	1.7255	0.5309	0.9335
	1.00	0	0.3101*	0.9698*
	1.50	0	0.2901*	0.9794*
	2.00	0	0.2580*	0.9720*
	3.00	0	0.3117*	0.9781*
20	0.25	5.3089	2.9122	0.9339
	0.50	1.7943	0.7458	0.9058
	1.00	0	0.3373*	0.9699*
	1.50	0	0.2999*	0.9767*
	2.00	0	0.2853*	0.9804*
40	0.25	3.6415	2.2656	0.9510
	0.50	1.3699	0.9122	0.9807
	1.00	0	0.3227*	0.9713*
	1.50	0	0.3291*	0.9830*
	2.00	0	0.3702*	0.9881*
60	0.25	2.3008	1.3368	0.9930
	0.50	0.1061	0.6579	0.9961
	1.00	0	0.4201*	0.9874*
	1.50	0	0.4235*	0.9961*
	2.00	0	0.4498*	0.9984*
100	0.25	1.0038	1.5734	0.9991
	0.50	0	0.8877*	0.9960*
	1.00	0.4003	0.8750	0.9973
	1.50	0.8231	0.8694	0.9958
	2.00	1.1321	1.2546	0.9923
	3.00	1.4785	1.6856	0.9974

* - valor calculado de modo a garantir que $\tau_0 \geq 0$

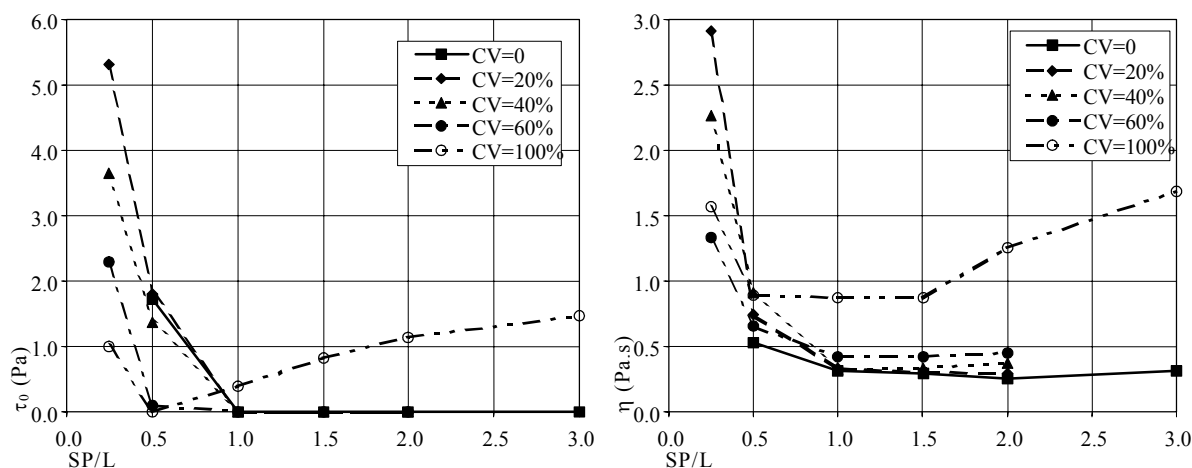


Figura 6 – Variação de τ_0 em função da % SP e variação de η em função da % SP (comportamento de Bingham).

Conforme referido, devido à desfloculação provocada pelo movimento do *spindle*, as pastas evidenciaram um comportamento diferenciado, traduzido pelas diferenças registadas no tramo ascendente e descendente dos reogramas. Desta forma, a área confinada entre o tramo ascendente e o tramo descendente deverá estar relacionada com a quantidade de pasta desfloculada durante o processo de mistura inerente ao próprio ensaio de Brookfield. Ao valor dessa área designou-se índice de desfloculação, I_d , expresso em Pa/s (ver Figura 7). Quanto maior for o valor do índice de desfloculação das pastas mais enérgica deverá ser a sua mistura para quebrar um maior número de ligações entre as partículas de ligante, que são responsáveis pela sua aglomeração. Quanto menor for o valor deste índice mais desfloculada se encontra a pasta e mais reversível é o seu comportamento.

Uma vez que o SP é introduzido nas composições com o objectivo de promover a dispersão e a desfloculação das partículas de ligante, a eficácia da quantidade empregue pode ser avaliada por intermédio do valor de I_d . Em pastas apresentando um valor de I_d elevado a quantidade de partículas de ligante floculadas deve ser também elevada, o que pode revelar a ineficácia do SP empregue ou a inadequação da sua dosagem.

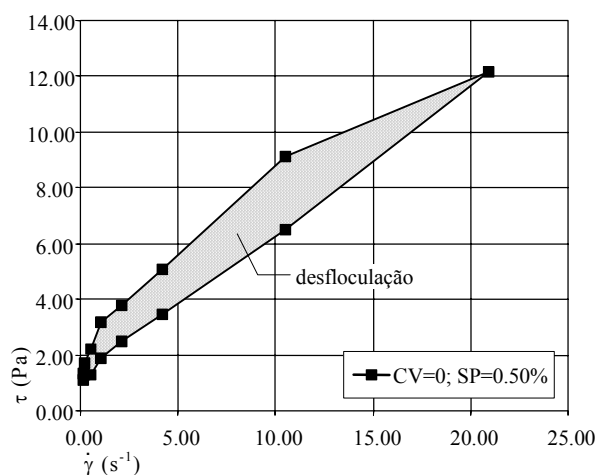


Figura 7 – Avaliação da desfloculação no ensaio do viscosímetro de Brookfield.

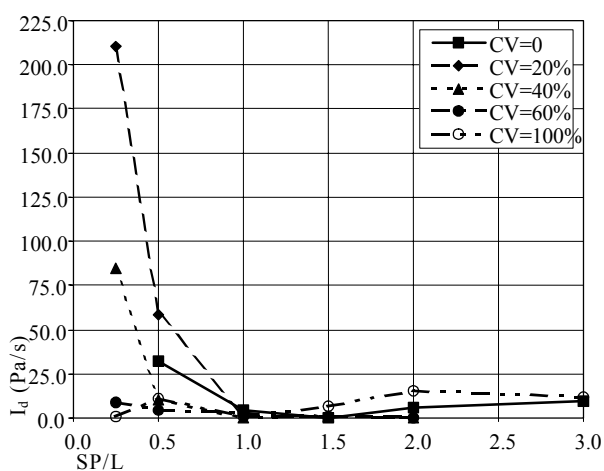


Figura 8 – Relação entre o índice de desfloculação e a dosagem de SP.

Os índices de desfloculação, I_d , determinados para as composições estudadas apresentam-se na Figura 8. Da análise dos resultados obtidos é possível retirar as seguintes observações:

- a partir de cerca de 1.0% de SP, não foram visíveis alterações significativas no índice de desfloculação das pastas, podendo, em relação a este parâmetro, ser considerada como dosagem óptima;
- o valor de I_d correspondente à dosagem óptima de SP foi próximo de zero o que indicia a adequabilidade do SP empregue, capaz de desflocular eficazmente as partículas de ligante de modo a não serem afectadas pelo processo de mistura adoptado;
- quantidades crescentes de SP de 0.25% até 1.0% permitiram reduções bastante acentuadas do I_d nas pastas constituídas com dosagens de CV até 40%. Acima de CV = 40%, as diferenças foram marginais;
- nas pastas fabricadas com as menores quantidades de SP (0.25% e 0.50%), a adição de CV parece contribuir significativamente para a diminuição de I_d .

5.3.Comparação dos resultados obtidos no cone de Marsh e no viscosímetro de Brookfield

A aferição dos parâmetros caracterizadores do comportamento reológico (τ_0 e η) permite estabelecer comparações com os resultados obtidos no cone de Marsh. Conforme referido anteriormente, é de esperar que as diferenças verificadas no tempo de escoamento sejam maioritariamente reflexo das diferenças entre as viscosidades das misturas testadas.

A confrontação dos resultados e a eventual detecção de relações entre η ou τ_0 e os valores obtidos no ensaio, que pode ser considerado expedito e com algum grau de empirismo, pode contribuir para o desejável esclarecimento da validade desse mesmo ensaio.

Representando a variação do tempo de escoamento das pastas no cone de Marsh com a tensão limite de escoamento e com a viscosidade, calculadas através dos resultados obtidos nos ensaios efectuados no viscosímetro de Brookfield, é possível constatar a independência do tempo de escoamento relativamente a τ_0 e a fraca relação entre o tempo de escoamento e η (ver Figura 9). Assim, parece não haver uma correlação directa entre as variáveis representadas.

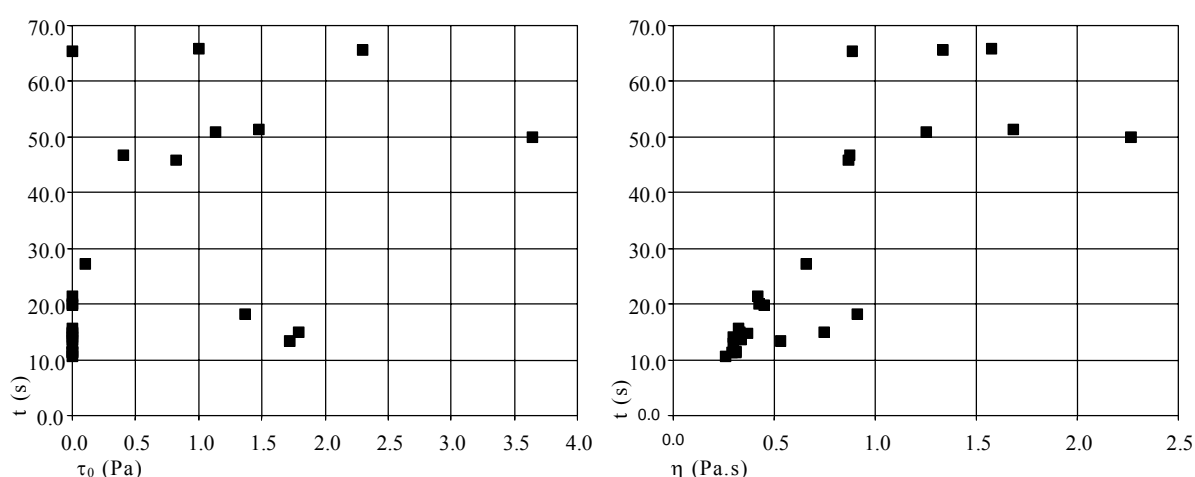


Figura 9 – Relação entre o tempo de escoamento das pastas e o respectivo limite de escoamento, τ_0 e viscosidade, η .

Insistindo na hipótese de o tempo de fluidez poder ser função da viscosidade das pastas, parece pertinente averiguar se a mesma falta de relação se verifica para todos os casos

ou se é possível isolar alguma característica específica que a permita estabelecer. Neste sentido, apresenta-se a Figura 10, onde são apresentados, exclusivamente, os resultados observados em pastas com comportamento newtoniano, isto é, com tensão limite de escoamento nula.

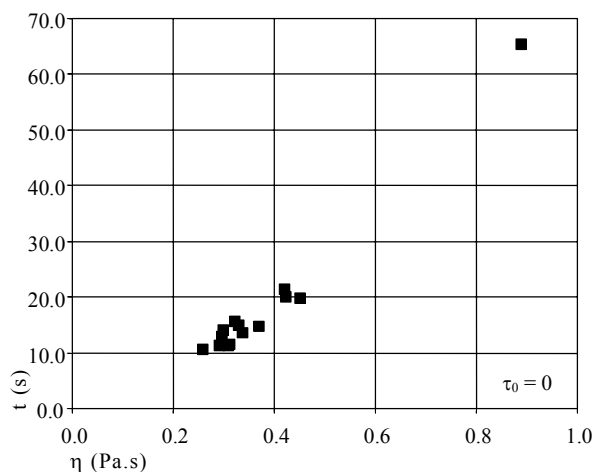


Figura 10 – Relação entre o tempo de escoamento e a viscosidade das pastas com comportamento newtoniano.

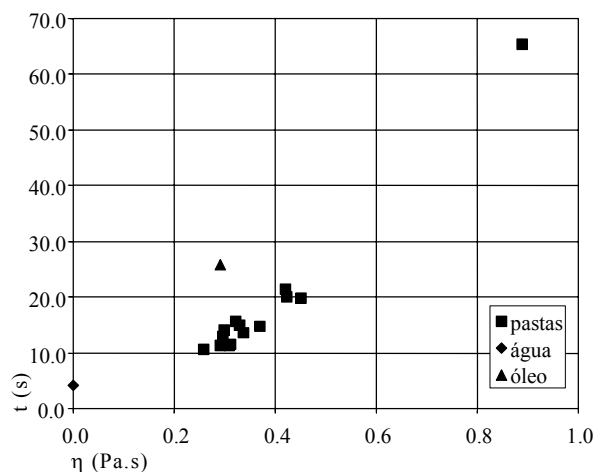


Figura 11 – Relação entre o tempo de escoamento e a viscosidade dos fluidos e suspensões com comportamento newtoniano.

Analisando a Figura 10, já é possível detectar a existência de uma relação, aparentemente linear, entre as variáveis envolvidas. No entanto, porque se verificou que existia uma grande concentração de pontos com viscosidades e correspondentes tempos de escoamento compreendidos entre 0.26 Pa.s a 0.45 Pa.s e 10.5 s a 21.5 s, respectivamente, e apenas um ponto substancialmente afastado desse intervalo, realizaram-se ensaios complementares com outros materiais que não pastas ligante. O ensaio de outros fluidos permite, também, avaliar a viabilidade do ensaio no cone de Marsh de modo mais abrangente, retirando alguma eventual especificidade das pastas ensaiadas. Assim, procedeu-se à determinação do tempo de escoamento no cone de Marsh e dos reogramas de dois fluidos: água e óleo lubrificante sintético disponível no mercado. A razão do recurso a estes dois materiais deveu-se ao comportamento newtoniano que exibem, bem como, para o caso da água, ao prévio conhecimento da viscosidade à temperatura a que decorreu o ensaio. Completando o gráfico da Figura 10 com os valores correspondentes aos novos fluidos ensaiados, obteve-se o gráfico representado na Figura 11. Por observação da Figura 11 é possível verificar que a consideração da água e do óleo veio provocar a perda da aparente relação linear entre o tempo de escoamento e a η que se verificava na Figura anterior. Contudo, esta situação não pode ser considerada como inesperada, uma vez que, pelo facto de se utilizar na comparação quer a água quer o óleo, introduziu-se uma nova variável na análise: a massa volúmica. Apesar de este aspecto não ter ainda merecido qualquer referência, a expectativa era a de que os fluidos com maior massa volúmica escoassem mais rapidamente do que os fluidos dotados de parâmetros reológicos semelhantes (τ_0 e η) mas com massa volúmica inferior, uma vez que a tensão de corte instalada é devida, fundamentalmente, à acção do seu peso.

A consideração da influência da massa volúmica das composições ensaiadas no tempo de escoamento pode pôr em causa as conclusões anteriormente apresentadas. Como é sabido, a massa volúmica das CV é inferior à do cimento, o que determina que composições com diferentes quantidades de CV tenham diferentes massas volúmicas, que necessariamente

influenciam os respectivos tempos de escoamento. Para atender a este facto, procedeu-se à determinação de um novo parâmetro, ao qual se convencionou chamar factor de escoamento, k_{esc} , e que foi obtido através do produto do tempo de escoamento verificado no cone de Marsh pela respectiva massa volúmica. A massa volúmica das pastas foi determinada a partir do conhecimento das massas volúmicas dos materiais constituintes e das respectivas quantidades introduzidas na mistura. Os resultados da consideração dos factores de escoamento apresentam-se na Figura 12.

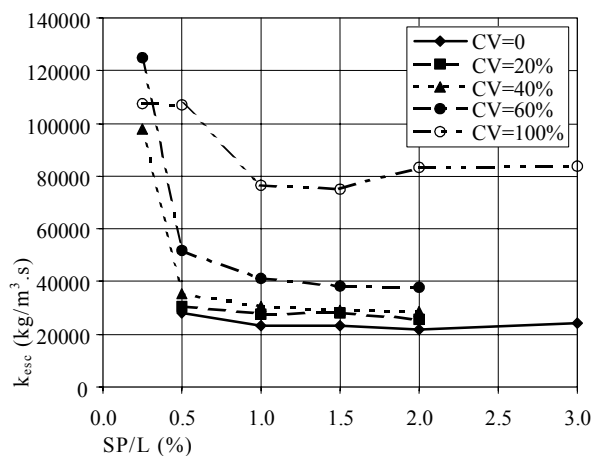


Figura 12 – Variação do factor de escoamento com a quantidade de SP.

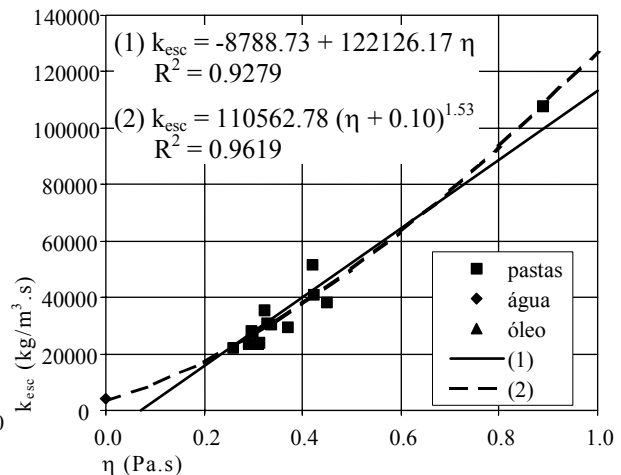


Figura 13 – Relação entre o factor de escoamento e a viscosidade dos fluidos e suspensões com comportamento newtoniano.

Confrontando a Figura 3 com a Figura 12, verifica-se que as conclusões anteriormente apontadas permanecem genericamente válidas.

Representando graficamente a variação do factor de escoamento, k_{esc} , com a viscosidade, obtém-se a Figura 13, onde é possível identificar a existência de uma relação entre ambas as quantidades. Na mesma Figura, também são apresentadas duas possíveis aproximações aos resultados obtidos, determinadas com recurso ao método dos mínimos quadráticos. Os elevados valores dos coeficientes de correlação comprovam a existência de uma dependência acentuada entre o factor de escoamento e a viscosidade, o que permite estimar a viscosidade dos fluidos testados a partir do conhecimento dos respectivos tempos de escoamento e correspondentes massas volúmicas.

Através da análise dos resultados obtidos é possível constatar que o ensaio do cone de Marsh permite caracterizar a reologia de fluidos newtonianos e pode ser considerado como um ensaio reológico, desde que se considere como resultado um factor de escoamento e não apenas o respectivo tempo de escoamento.

6. CONCLUSÕES

Tendo como objectivo caracterizar o comportamento reológico das pastas produzidas com diferentes quantidades de CV e com uma relação A/L constante, realizaram-se ensaios no viscosímetro de Brookfield. O comportamento das pastas ensaiadas comprovou a viabilidade da adopção do modelo de Bingham. Desta forma, a reologia das pastas pode ser descrita através de dois parâmetros, caracterizadores do comportamento reológico das suspensões: a tensão limite de escoamento, τ_0 , e a viscosidade, η .

A realização do ensaio no viscosímetro de Brookfield também proporcionou a comparação dos seus resultados, considerados como padrão, com os obtidos num ensaio expedito, de utilização corrente: o ensaio no cone de Marsh.

Relativamente à determinação da quantidade óptima de SP, os resultados dos ensaios efectuados comprovam ser possível a sua determinação recorrendo ao ensaio no cone de Marsh. A determinação do ponto de saturação do SP pode ser efectuada recorrendo directamente aos tempos de escoamento verificados no cone de Marsh mas, não se mostrou viável a comparação do comportamento reológico de pastas diferentes, que apresentem massas volúmicas distintas, recorrendo à análise directa dos tempos de escoamento. Os resultados obtidos permitiram verificar a existência de uma forte correlação entre os valores de η determinados e um factor de escoamento, k_{esc} , determinado através do produto da massa volúmica do material sujeito a ensaio pelo respectivo tempo de escoamento.

Assim, propõe-se que a comparação do comportamento reológico de pastas com massa volúmica diferente, não seja realizada recorrendo aos tempos de escoamento verificados, mas sim aos factores de escoamento.

Os ensaios efectuados permitiram determinar uma dosagem de SP a partir da qual os ganhos não se apresentam, aparentemente, significativos, correspondendo ao ponto de saturação. Os ensaios em pastas indicam que a quantidade óptima de SP deve ser de cerca de 1.0%.

A acção dos SP é particularmente notória na redução do τ_0 das misturas, provocando a sua diminuição consecutiva até atingir a quantidade óptima, para a qual os fluidos testados exibiram um comportamento newtoniano. Para quantidades de SP superiores, as variações de τ_0 foram, em geral, marginais. Este aspecto, realça a adequabilidade dos ensaios no cone de Marsh, nomeadamente na determinação do ponto de saturação, sendo previsível, face aos resultados obtidos, que ao ponto de saturação determinado esteja associada uma mistura com comportamento newtoniano, perfeitamente caracterizável recorrendo ao ensaio no cone de Marsh.

Relativamente à viscosidade, o efeito do aumento da dosagem de SP parece ser semelhante, não sendo as diferenças de η provocadas pelas quantidades de SP empregues tão acentuadas como as verificadas nos respectivos τ_0 , nomeadamente para dosagens de SP entre 0.5% e 1.0%. Para esta amplitude de variação de SP, os resultados dos ensaios no cone de Marsh apresentaram diferenças, aparentemente, pouco significativas, principalmente até dosagens de 40% de CV.

Em relação à adição de CV, os ensaios permitiram concluir que, em geral, quanto maior for a quantidade de CV, pior é o comportamento das misturas, acentuando-se esta tendência para quantidades de substituição de C por CV de 100%. No entanto, a adição de CV parece contribuir para a redução de τ_0 e η em composições fabricadas com SP = 0.25%. Para SP = 0.5%, a adição de CV contribuiu para a redução de τ_0 até quantidades de 60%, sendo o efeito na η contrário, acompanhando a tendência geral descrita. Face ao apresentado, é possível concluir que o efeito do SP é mais eficaz no cimento do que nas CV.

7. REFERÊNCIAS

Camões, A., *Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes*, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal (2002).

Daczko, J.A., A proposal for measuring rheology of production concrete, *Concrete International*, ACI, 22(5), May, 47-49 (2000).

Domone, P. L. J., Yongmo, Xu e Banfill, P.F.G., Developments of the two-point workability test for high-performance concrete, *Magazine of Concrete Research*, 51(3), June, 171-179 (1999).

Ferraris, C.F. e Lobo, C.L., Processing of HPC, *Concrete International*, ACI, 4, April, 61-64 (1998).

Ferraris, C.F., Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 104, (2), September-October, 461-478 (1999).

Hu, C., Larrard, F., e GjØrv, O.E., Rheological testing and modelling of fresh high performance concrete, *Materials and structures / Matériaux et constructions*, 28(175), January-February, 1-7 (1995).

Smeplass, S., Applicability of the Bingham model to high strength concrete, Special Concretes: Workability and Mixing, *Proceedings of the International RILEM Workshop*, Edit. Peter J. M. Bartos, E&FN SPON, Paisley, Scotland, March 2/3, 145-151 (1993).

Wang, K., Konsta-Gdoutos, M.S. e Shah, S.P., Hydration, rheology, and strength of ordinary Portland cement (OPC) cement kiln dust (CKD) slag binders, *ACI materials journal*, 99(2), March-April, 173-179 (2002).

